

УДК 621.391.825

Модальные фильтры для защиты от сверхкоротких импульсов: исследование возможностей эффективного использования в двусторонних печатных платах

Самойличенко М. А.*

*Научный руководитель исследования: заведующий кафедрой телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, д.т.н., доцент Газизов Т. Р.

Актуальность работы: развитие современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) идет по пути непрерывного роста быстродействия, автономности и компактности. Ведется поиск новых технологий передачи сигналов и методов проектирования РЭА. Расширение диапазона рабочих частот, уменьшение уровней питающих напряжений, а также увеличение плотности, монтажа ухудшают электромагнитную обстановку. Элементы РЭА становятся более уязвимыми к электромагнитным помехам. Опасным видом такого рода помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ) – мощные кондуктивные воздействия малой длительности. Имеется большой выбор помехозащитных устройств, однако их особенности часто ограничивают их применения. Современные устройства защиты требует упрощения и удешевления их реализации, поэтому актуально их совершенствование. Гораздо проще, по схемотехнике, конструкции и изготовлению, устройство защиты от СКИ, называемое модальным фильтром (МФ). Существенными достоинствами МФ являются небольшая масса, повышенная надежность, радиационная стойкость и высокое быстродействие. Также, МФ можно интегрировать в печатные платы (ПП), в частности двусторонние. Одним из известных вариантов является МФ на двухсторонней ПП с лицевой и торцевой связями. Однако, из-за большого количества пассивных проводников, возможно, будет затруднительна интеграция именно такого МФ. Поэтому **цель работы** – исследовать влияние удаления одного и двух пассивных проводников в МФ на двухсторонней печатной плате с лицевой и торцевой связями. **Результат:** показана возможность разложения СКИ в МФ на двухсторонней печатной плате с лицевой и торцевой связями с удалением одного и двух пассивных проводников и выявлены случаи с таким же ослаблением, как без удаления. **Используемые методы:** при моделировании использовался квазистатический анализ. **Практическая значимость:** возможность простой и дешевой защиты от СКИ в широко используемых двусторонних печатных платах.

Ключевые слова: модальный фильтр, сверхкороткий импульс, печатная плата, проводник.

Актуальность

Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) развивается в сторону создания все более сложных технических средств и миниатюризации не только электронных компонентов, но и изделий, где эти компоненты применяются. Как следствие, возрастают плотность компоновки и взаимное влияние компонентов, в результате чего неизбежно возникновение помех, от которых необходимо защитить аппаратуру [1].

Библиографическая ссылка на статью:

Самойличенко М. А. Модальные фильтры для защиты от сверхкоротких импульсов: исследование возможностей эффективного использования в двусторонних печатных платах // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 58-71. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-58-71

Reference for citation:

Samoylichenko M. A. Modal filters for protection against ultrashort pulses: a study of the possibilities of effective use in double-sided printed circuit boards. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 4, pp. 58-71 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-4-58-71

Частой причиной нарушения работы РЭА является воздействие кондуктивных помех в виде импульсных перенапряжений, которые распространяются в проводящих цепях питания, управления, коммутации, а также в цепях полезных сигналов. Одним из видов кондуктивных помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ). Их основными особенностями являются широкий спектр и большая амплитуда. СКИ опасны из-за высокой проникающей способности, обусловленной малой длительностью, большой мощностью и широким спектром [2].

При появлении импульсных перенапряжений могут иметь место нарушения в виде пробоя диэлектрического слоя между проводящими элементами или р-п переходов полупроводниковых компонентов, расплавления и обрывов токоведущих дорожек, разрушения мест пайки и сварки проводников из-за термо- и электродинамических напряжений [3-6]. Импульсные кондуктивные электромагнитные помехи вызывают в цепях аналоговых микросхем опасные переходные процессы. В цепях цифровых микросхем они могут привести к нежелательным переключениям. Особенно остро этот вопрос стоит для «ответственных» устройств военной и гражданской техники, от нормальной работы которых зависит жизнь людей (датчики на АЭС, пилотажно-навигационное оборудование самолетов, кораблей и т.п.) или нарушение работы которых могут приводить к крупным материальным потерям (устройства хранения информации, ЭВМ) [7-12].

Задача защиты – предотвращать или сводить к минимуму ущерб, вызванный скачком напряжения, при этом сама система защиты или защитный элемент должны срабатывать безопасным способом. Современные цифровые и аналоговые микросхемы сами по себе, как правило, имеют специальные защитные цепи, обеспечивающие проводящие пути для устранения помех. На рынке предлагается множество приборов, обеспечивающих хорошую защиту от перенапряжений. Помимо традиционных плавких предохранителей, простейших LC- и RC-фильтров, широко используются специализированные приборы – газовые разрядники, варисторы, TVS-диоды.

Газовые разрядники служат для защиты от самых мощных помех, они применяются в качестве первичной защиты телекоммуникационных и силовых цепей. Значение пиковых токов у них достигает тысячи ампер, при этом число срабатываний оказывается достаточно большим. Среди недостатков можно отметить высокое напряжение включения, значительные габариты и низкое быстродействие. Продолжительное срабатывание (более 0,15 мкс) не решает проблемы защиты многих полупроводниковых приборов и микросхем [13, 14].

Варисторы, благодаря высокому соотношению пиковых токов и габаритов, оптимальны для создания максимально компактных решений при защите от мощных помех. Обладая широким диапазоном рабочих токов и напряжений, они успешно служат для защиты электронных компонентов на печатной плате. К недостаткам варисторов относятся ограниченный срок службы и большая собственная емкость (тысячи пикофард), не допускающая их включение в высокоскоростные линии передачи данных, а также проблема SMD монтажа [14, 15].

TVS-диоды, имеющие наименьшее значение напряжений и самое быстрое время срабатывания среди всех перечисленных компонентов, могут применяться в низкоомных цепях. Они хорошо подходят для защиты полупроводниковых приборов или организации оконечной ступени в комбинированных защитных устройствах. Их достоинства – высокая долговечность и широкий диапазон рабочих напряжений. Низкая собственная емкость не влияет на сигнальные и логические линии, позволяя устанавливать их в различных коммуникационных интерфейсах. Однако и они имеют некоторые недостатки, такие как низкое значение номинального импульсного тока и высокая стоимость [15].

Таким образом, все устройства защиты имеют свои недостатки, поэтому актуален поиск новых устройств, лишенных этих недостатков.

В последнее время повысился интерес к возможности применения в РЭА полосковых и микрополосковых линий передачи в качестве защитных устройств. К их достоинствам относят простоту конструкции, надежность, малую стоимость, возможность автоматизированного производства, практически неограниченный срок службы, функционирование в широком диапазоне напряжений. К новым устройствам защиты на основе связанных линий относятся модальные фильтры (МФ), работающие на основе модальных искажений [16].

Исследование технологии МФ ведется по четырем основным направлениям. Первое – МФ в печатных платах. Исследованы и изготовлены МФ с разными конструктивными особенностями, например, зеркально-симметричный МФ [17], МФ с периодическим профилем области связи проводников [18], простой асимметричный МФ [19]. Второе – МФ в виде кабелей. Исследованы существующие трехпроводные силовые кабели плоского и круглого сечений [20]. В работе [21] представлены результаты моделирования и оптимизации многопроводных МФ с круговым поперечным сечением: рассмотрены 4 структуры из 2-5 проводников. Другой подход к модальному разложению СКИ основан на использовании меандровых линий. Например, в работе [22] исследовано разложение СКИ в витке меандровой микрополосковой линии. Четвертым направлением является модальное резервирование, первые результаты которого систематизированы в работе [23].

Особый интерес представляет исследование МФ на двухсторонней печатной плате (ПП) с использованием полигонов схемной земли. Это обусловлено тем, что двухсторонние ПП применяются для широкого круга современных изделий, как специального назначения, так и в бытовой технике. Столь широкое распространение объясняется меньшими трудозатратами при проектировании и разводке ПП и более простой, по сравнению с многослойными ПП, технологией изготовления. А использование полигонов схемной земли в МФ позволит их реализовывать не только как отдельные защитные устройства, но интегрировать в двусторонние ПП. Так, ранее исследованы и изготовлены макеты МФ с реализацией пассивного проводника в вырезе опорной плоскости [24]. Исследовано влияние удаления опорных проводников в МФ на двухсторонней ПП [25].

Одним из новых вариантов МФ на двухсторонней ПП является МФ с лицевой и торцевой связями (рис. 1) между активным и тремя пассивными проводниками, за счет чего возможно большее ослабление опасного СКИ [23]. Однако, из-за плотного монтажа ПП, интеграция такого МФ с большим количеством пассивных проводников, возможно, будет затруднительна. Поэтому, цель данной работы – исследовать влияние удаления одного и двух пассивных проводников в МФ на двухсторонней ПП с лицевой и торцевой связями.

Результаты моделирования

Поперечное сечение исходного МФ приведено на рис. 1а. Параметры поперечного сечения: h – толщина диэлектрика, w – ширина активного и пассивных проводников, w_1 – ширина опорных проводников, s – расстояние между проводниками, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость, t – толщина фольги. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит ($\epsilon_r=4,5$) из-за его широкого распространения.

Схема включения представлена на рис. 1б. Активный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с. E и внутренним сопротивлением $R1$. На другом конце активный проводник соединен с нагрузкой $R5$. Значения сопротивлений $R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7$ приняты равными 50 Ом. Входное воздействие представляет собой трапециевидный импульс с параметрами: амплитуда ЭДС – 2 В, время нарастания 150 пс, плоская вершина – 200 пс и время спада 150 пс. Вычисление параметров и форм сигнала выполнено с помощью квазистатического подхода в системе TALGAT [26]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Моделирование выполнялось со следующими параметрами: $h=500$ мкм, $w=1000$ мкм, $w_1=500$ мкм, $s=300$ мкм, $t=70$ мкм при длине МФ $l=1$ м. На данном этапе моделирования выбор параметров МФ обусловлен тем, что на выходе всех МФ проявлялись все моды, которые распространяются в линии.

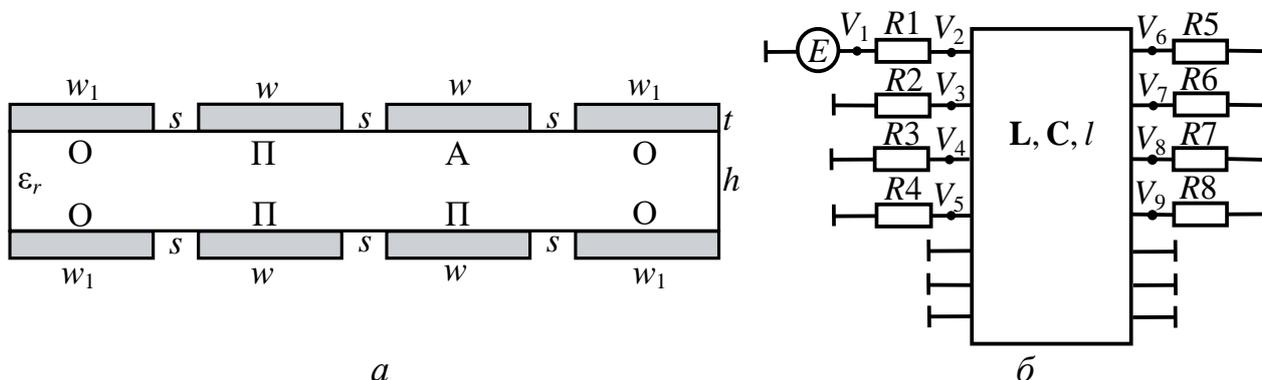


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема включения МФ (б).
Проводники: А – активный, П – пассивный, О – опорный

На рис. 2 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ. Входной сигнал (СКИ) раскладывается на 7 импульсов (в соответствии с числом мод, по числу проводников, не считая одного опорного). Од-

нако импульсы 2 и 3, а также 4 и 5, накладываются друг на друга. Это объясняется малой разностью погонных задержек мод ($\tau_3 - \tau_2 = 0,131$ нс/м и $\tau_5 - \tau_4 = 0,029$ нс/м), что приводит к увеличению амплитуды. Так, из-за наложения импульсов с погонными задержками τ_3 и τ_2 получается максимальная амплитуда на выходе МФ 0,425 В. Значения задержек и амплитуд приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Погонные задержки мод (τ_i , нс/м) и амплитуды (U_i , В) импульсов

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
4,282	4,668	4,799	5,472	5,501	5,991	6,540	0,0093	0,425		0,095		0,170	0,200

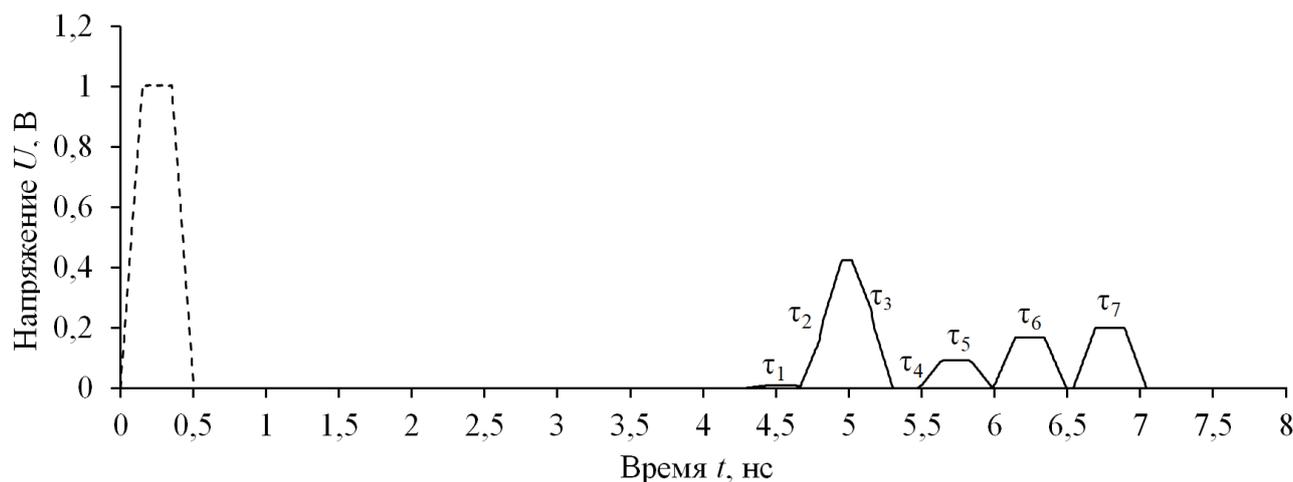


Рис. 2. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ

Поперечные сечения МФ без одного пассивного проводника (левого нижнего, правого нижнего, левого верхнего) показаны на рис. 3а, б, в, а схема включения – рис. 3г.

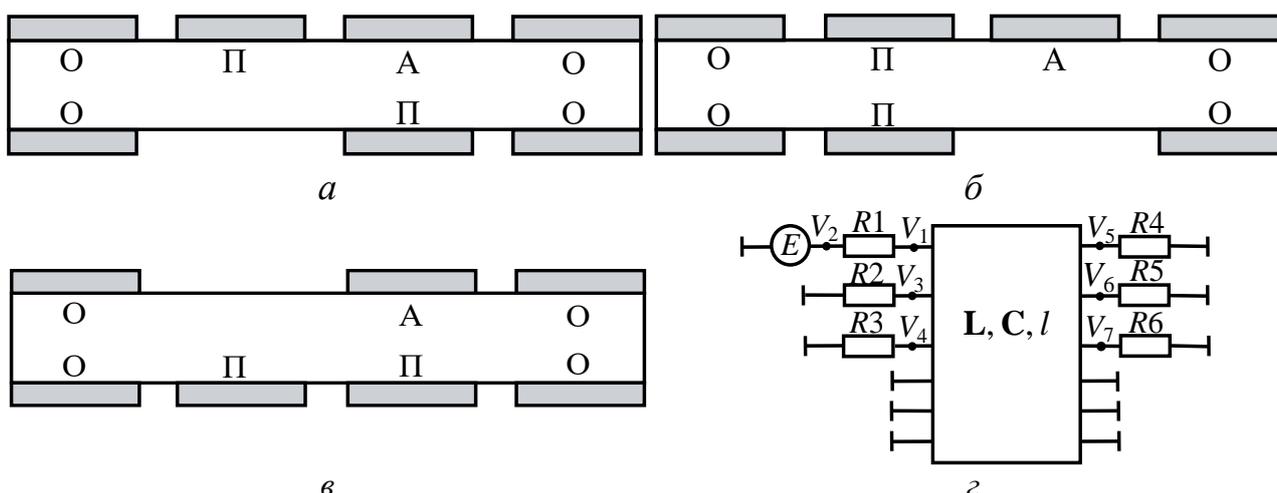


Рис. 3. Поперечные сечения МФ без левого нижнего (а), правого нижнего (б) и левого верхнего (в) пассивных проводников и схема включения МФ (г)

На рис. 4 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ, при удалении одного пассивного проводника. Видно, что входной сигнал раскладывается на 6 импульсов мод. Как и со всеми проводниками, видно наложение импульсов мод 2 и 3, а также 4 и 5. Но значение $\tau_3 - \tau_2$ больше,

и на выходе МФ более четко видны импульсы 2 и 3. Удаление правого нижнего пассивного проводника увеличивает разность τ_2 и τ_1 до 0,5 нс/м, тогда как при удалении левого нижнего и левого верхнего значения $\tau_2 - \tau_1$ почти одинаковы и равны 0,372 нс/м и 0,371 нс/м соответственно. Максимальная из амплитуд импульсов с удалением правого пассивного проводника почти удваивается (0,804 В), тогда как при удалении левого нижнего пассивного проводника становится даже в 1,16 раза меньше (0,365 В), чем без удаления. Значения задержек и амплитуд приведены в таблице 2 и 3.

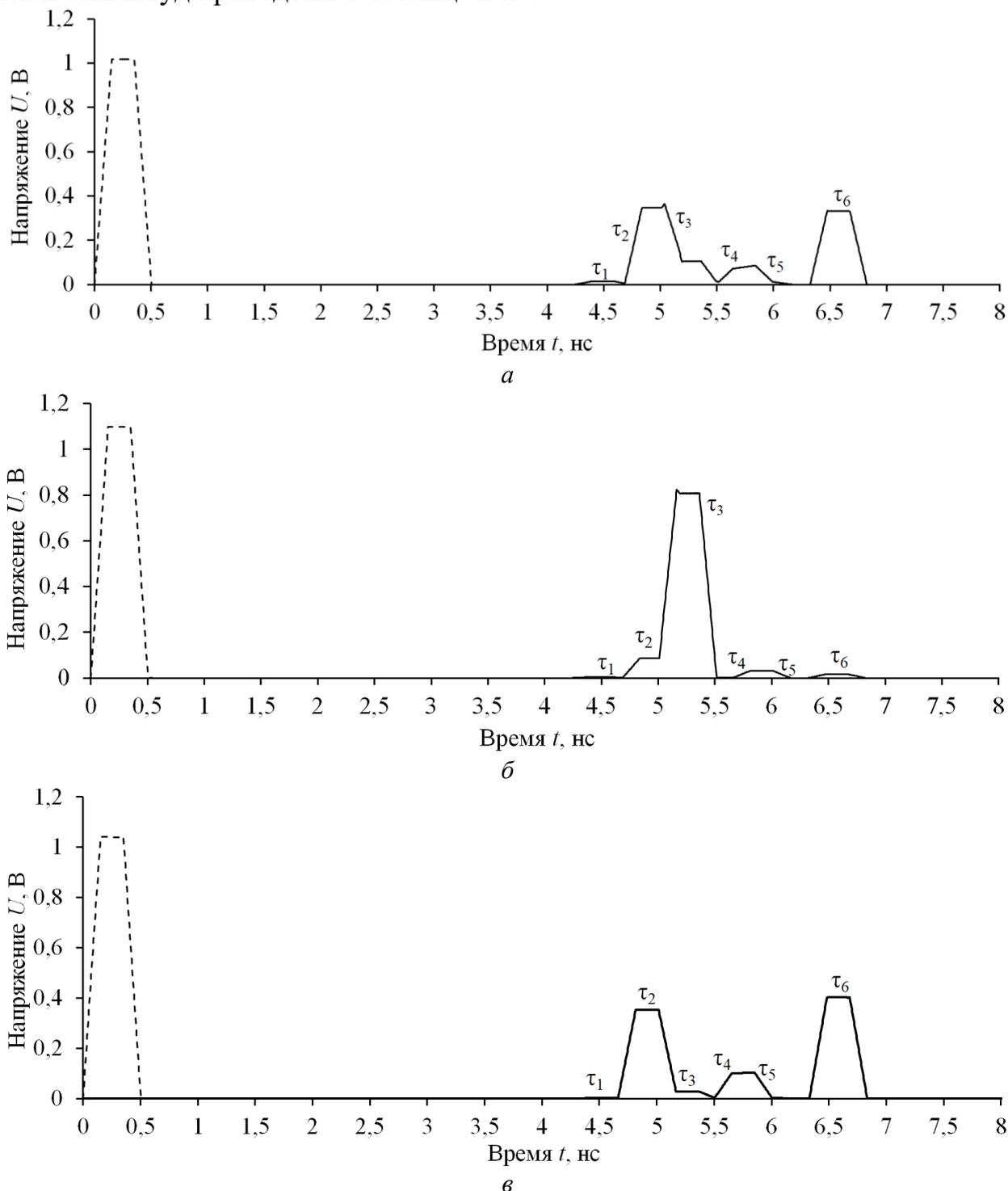


Рис. 4. Формы напряжения на входе (- -) и выходе (-) МФ без левого (а) и правого нижних (б), левого верхнего (в) пассивных проводников

Таблица 2 – Погонные задержки мод (τ_i , нс/м)

МФ без пассивного проводника	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6
левого нижнего	4,292	4,663	5,011	5,500	5,672	6,327
правого нижнего	4,183	4,682	5,017	5,500	5,664	6,328
левого верхнего	4,292	4,663	5,011	5,500	5,670	6,330

Таблица 3 – Амплитуды (U_i В)

МФ без пассивного проводника	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
левого нижнего	0,0147	0,365		0,0848		0,333
правого нижнего	0,0043	0,825		0,0324		0,0195
левого верхнего	0,0068	0,362		0,0919		0,410

Также интерес представляет удаление двух пассивных проводников. Так, удаление двух нижних проводников обеспечивает только торцевую связь между верхними проводниками, удаление двух левых проводников – лицевую связь, а удаление проводников по диагонали (левого сверху и правого снизу) – смешанную (торцово-лицевую) связь. Поперечные сечения МФ без двух пассивных проводников показаны на рис. 5а, б, в, а схема – на рис. 5г.

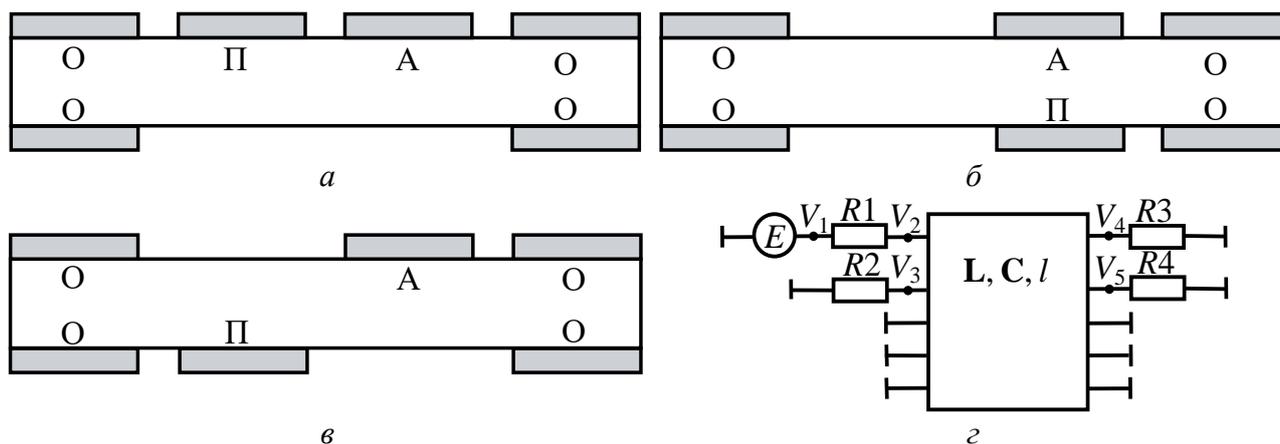


Рис. 5. Поперечные сечения МФ без двух нижних (а), левых (б), диагональных (z) пассивных проводников и схема включения МФ (v)

На рис. 6 показаны результаты моделирования форм напряжения на входе и выходе МФ без двух пассивных проводников. При удалении нижних $\tau_3 - \tau_2 = 0,206$ нс/м, так что из-за наложения импульсов мод 2 и 3 максимальная амплитуда на выходе МФ почти удваивается (0,843 В). При удалении диагональных на выходе МФ видно два импульса с амплитудами $U_2 = 0,442$ В и $U_3 = 0,430$ В, так что результирующая амплитуда лишь немногим больше, чем без удаления. Удаление левых проводников позволило увеличить разность погонных задержек мод между импульсами 2 и 3, а также между 4 и 5, что позволило увидеть импульсы 2 и 5. Однако, при этом уменьшилась разность погонных задержек мод между импульсами 3 и 4 из-за чего они наложились. Максимальная амплитуда составила 0,410 В, так что результирующая амплитуда даже

меньше, чем без удаления. Значения задержек и амплитуд приведены в таблице 4.

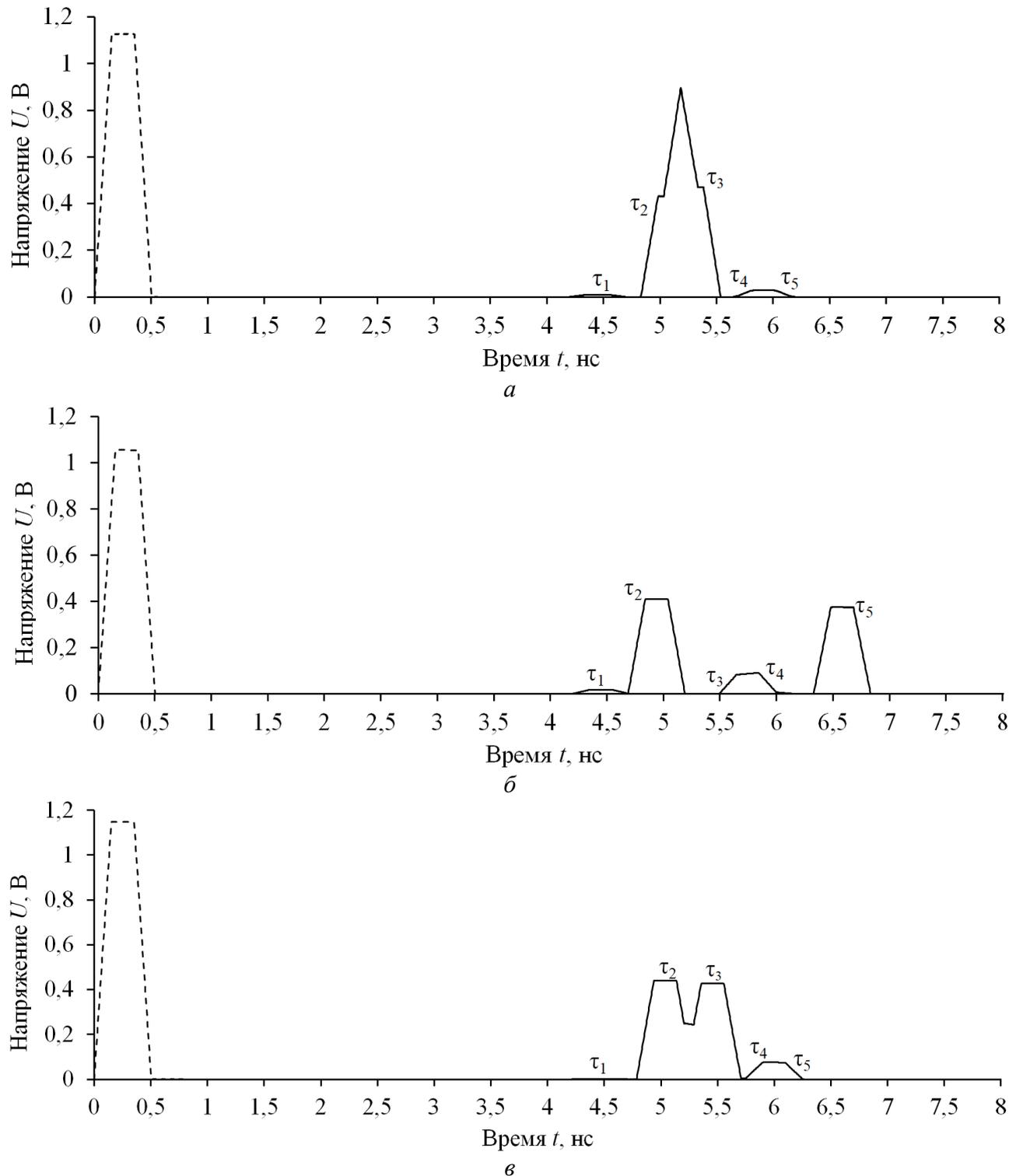


Рис. 6. Формы напряжения на входе МФ (- -) и выходе МФ (-) без двух нижних (а), левых (б) и диагональных (в) пассивных проводников

Таблица 4 – Погонные задержки мод (τ_i , нс/м) и амплитуды (U_i В) импульсов

МФ без двух пассивных проводников	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
нижних	4,196	4,832	5,038	5,652	5,685	0,008	0,843		0,027	
левых	4,194	4,687	5,494	5,649	6,329	0,017	0,410	0,090		0,376
диагональных	4,210	4,785	5,203	5,638	5,749	0,002	0,444	0,429	0,078	

Заключение

В работе показана возможность разложения СКИ в исходном МФ на двухсторонней ПП с лицевой и торцевой связями и в его конфигурациях с удалением одного и двух пассивных проводников. При рассмотренных параметрах наибольшее ослабление СКИ достигнуто в МФ без левого верхнего пассивного проводника. Ослабление по отношению к половине ЭДС СКИ составило 2,74 раза, тогда как было 2,35 раза без удаления проводников. Примечательно, что почти такое же ослабление осталось и при удалении диагональных и левых проводников.

Таким образом, возможно упрощение интеграции подобных МФ в ПП с разной плотностью монтажа. В отдельных случаях важно и уменьшение массы МФ и даже его стоимости, если учитывать удаление и резисторов на концах проводников.

Между тем, для каждой из рассмотренных структур МФ можно достичь большего ослабления СКИ. Поэтому, в дальнейшем актуально выполнение следующих исследований:

1. оптимизация параметров поперечных сечений по критерию минимизации амплитуды выходного напряжения за счет выравнивания амплитуд импульсов;
2. оптимизация аналогично п. 1, но по критерию выравнивания разностей погонных задержек мод;
3. исследование влияния граничных условий на концах пассивных проводников (короткое замыкание (КЗ) – холостой ход (ХХ) и ХХ–КЗ);
4. последовательное включение МФ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90033.

Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7. С. 124-125.
2. Gizatullin Z. M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. № 5. P. 546–550.
3. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Исследование стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 3(56). С. 375-378.

4. Абдурахимов Д. Е., Вахидов Ф. Ш., Берецагин В. Л., Калинушкин В. И., Плоппа М. Г., Райзер М. Д. Изменение свойств полупроводниковых материалов в результате воздействия СВЧ импульсов наносекундной и микросекундной длительности // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. № 1. С.21-25.

5. Ключник А.В., Солодов А.В. Статистическая модель повреждения цифровых интегральных микросхем импульсным радиоизлучением // Радиотехника. 2010. №2. С. 37-41.

6. Старостенко В.В., Грибский М. П., Полетаев Д. А., Таран Е. П., Чурюмов Г. И. Динамика электротепловых процессов в диэлектрических структурах микросхем при воздействии электромагнитных полей // Радиотехника и информатика. 2007. № 4. С. 45-49.

7. Бердышев А. В. Влияние воздействия мощных СВЧ-импульсов на УКВ-радиостанцию // Антенны. 2001. № 5. С. 57-60.

8. Sanders F. H., Sole R. L., Bedford B. L., David Franc D., Pawlowitz T. Effects of RF Interference on Radar Receivers // NTIA Report. 2006. №. 06-444.

9. Arnesen O. H., Krogager E., Bäckström M., Bø-Sande S., Godø J., Härkönen S. High Power Microwave Effects on Civilian Wireless Equipment // EMC Europe Workshop, (Rome, September 2005). – Rome, 2005. Vol. 5.

10. Юшков Ю. Г., Чумерин П. Ю., Артёменко С. Н., Новиков С. А., Зеленцов Д. В. Экспериментальное исследование воздействия СВЧ импульсов на работу персонального компьютера // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 8. С. 1020-1024.

11. Mansson D., Thottappillil R., Nilsson T., Lunden O. M-Susceptibility of Civilian GPS Receivers to Electromagnetic Radiation // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008. Vol. 50. No. 2. P. 434-437.

12. Сахаров К. Ю., Михеев О. В., Туркин В. А., Корнев А. Н. Долбня С. Н., Певнев А. В. Исследование функционирования локальных вычислительных сетей в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 3. С. 36-46.

13. Капура И. А., Бакуменко Б. В. Анализ методов и средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных излучений // Системи обробки інформації. 2010. №. 6. С. 87-90.

14. Верхулевский К. Защитные TVS-устройства компании Semtech: разнообразие выбора // Компоненты и технологии. 2017. № 3. С. 25-30.

15. Han S. M., Huh C. S., Choi J. S. A validation of conventional protection devices in protecting EMP // Progress in Electromagnetic Research. 2011. Vol. 119. P. 253-263.

16. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizova O. A. New printed structures for protection against UWB pulses // in 2015 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (Erlagol, 29 June-3 July 2015). – Erlagol, 2015. –P. 120–122.

17. Жечев Е. С., Черникова Е. Б., Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального

фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 162–179.

18. Хажибеков Р. Р. Исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров с пассивным проводником в виде последовательности отрезков линий передачи // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22. № 2. С. 31–36.

19. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142.

20. Zabolotsky A. M., Gazizov T.R. Experimental results on UWB pulse propagation in low-voltage power cables with different cross sections // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2012. Vol. 54. № 1. P. 229–231.

21. Belousov A. O., Vlasova N.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1862. No. 012020. P. 1–5.

22. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Gazizov T.R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. Vol. 59. № 6. P. 1864–1871.

23. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144.

24. Samoylichenko M. A., Zhechev. Y. S., Kosteletskii V. P., Gazizov T. R. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2021. Vol. 63. № 2. P. 435–442.

25. Samoylichenko M. A., Gazizov T. R. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1862. № 012020. P. 1–7.

26. Gazizov T. R., Sagiyeva I. Ye., Kuksenko S. P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations // Complexity. 2019. vol. 2019. 11 pages.

References

1. Rentyuk V. Elektromagnitnaya sovместimost': problema, ot kotoroy ne uyti [Electromagnetic compatibility: a problem that cannot be avoided]. *Components & Technologies*, 2017, no. 7, pp. 124-125 (in Russian).

2. Gizatullin Z. M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, no 5, pp. 546–550.

3. Klyuchnik A. V., Pirogov Yu. A., Solodov A. V. Issledovaniye stoykosti integral'nykh mikroskhem v elektromagnitnykh polyakh impul'snogo radioizlucheniya [Investigation of the stability of integrated microcircuits in electromagnetic fields of pulsed radio emission]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2011, vol. 56, no. 3, pp. 375-378 (in Russian).

4. Abdurakhimov D. E., Vakhidov F. Sh., Bereschagin V. L., Kalinushkin V. I., Poppa M. G., Raizer M. D. *Izmeneniye svoystv poluprovodnikovyykh materialov v rezul'tate vozdeystviya SVCH impul'sov nanosekundnoy i mikrosekundnoy dlitel'nosti* [Change of properties of semiconductor materials from exposure to microwave pulses of nanosecond and microsecond duration]. *Russian Microelectronics*, 1991, vol. 20, no. 1, pp. 21-25 (in Russian).

5. Klyuchnik A.V., Solodov A.V. *Statisticheskaya model' povrezhdeniya tsifrovyykh integral'nykh mikroskhem impul'snym radioizlucheniym* [Statistical model of damage to digital integrated circuits by pulsed radio emission]. *Radiotekhnika*, 2010, no. 2, pp. 37–41 (in Russian).

6. Starostenko V. V., Gribskiy M. P., Poletayev D. A. et al. *Dinamika elektroteplovykh protsessov v dielektricheskikh strukturakh mikroskhem pri vozdeystvii elektromagnitnykh poley* [Dynamics of electrothermal processes in dielectric structures chips when exposed to electromagnetic fields]. *Radiotekhnika i informatika*, 2007, no. 4, pp. 45-49 (in Russian).

7. Berdyshev A. B. *Vliyaniye vozdeystviya moshchnykh SVCH-impul'sov na UKV-radiostantsiyu* [Influence of exposure to powerful microwave pulses on a VHF radio station]. *Antenny*, 2001, no. 5, pp. 57-60 (in Russian).

8. Sanders F. H., Sole R. L., Bedford B. L., David Franc D., Pawlowitz T. *Effects of RF Interference on Radar Receivers. NTIA Report*, 2006, no. 06-444.

9. Arnesen O.H., Krogager E., Bäckström M., Bø-Sande S., Godø J., Härkönen S. *High Power Microwave Effects on Civilian Wireless Equipment*. EMC Europe Workshop. Rome, 2005, vol. 5.

10. Yushkov YU. G., Chumerin P. YU., Artomenko C. H., Novikov S. A., Zelentsov D. V. *Eksperimental'noye issledovaniye vozdeystviya SVCH impul'sov na rabotu personal'nogo komp'yutera* [Experimental study of the effect of microwave pulses on the operation of a personal computer]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2001, vol. 46, no. 8, pp. 1020-1024 (in Russian).

11. Mansson D., Thottappillil R., Nilsson T., Lunden O. *M-Susceptibility of Civilian GPS Receivers to Electromagnetic Radiation. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, vol. 50, no. 2, pp. 434-437.

12. Sakharov K. YU., Mikheyev O. B., Turkin V. A., Kornev A. N., Dolbnya S. N., Pevnev A. V. *Issledovaniye funktsionirovaniya lokal'nykh vychislitel'nykh setey v usloviyakh vozdeystviya sverkhkorotkikh elektromagnitnykh impul'sov* [Investigation of the functioning of local area networks under the influence of ultrashort electromagnetic pulses]. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2006, no. 3, pp. 36-46 (in Russian).

13. Kapura I. A., Bakumenko B. V. *Analiz metodov i sredstv zashchity radioelektronnoy apparatury ot vozdeystviya moshchnykh elektromagnitnykh izlucheniyy* [Analysis of methods and means of protection of radio-electronic equipment from the impact of powerful electromagnetic radiation]. *Sistemi obrobki informatsii*, 2010, no. 6, pp. 87-90 (in Ukraine).

14. Verkhulevskiy K. *Zashchitnyye TVS-ustroystva kompanii Semtech: raznoobraziye vybora* [Protective TVS-devices from Semtech: a variety of choices]. *Components & Technologies*, 2017, no. 3, pp. 25-30 (in Russian).

15. Han S. M., Huh C. S., Choi J. S. A validation of conventional protection devices in protecting EMP. *Progress in Electromagnetic Research*, 2011, vol. 119, pp. 253-263.

16. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizova O. A. New printed structures for protection against UWB pulses. *Trudy 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. Erlagol, 2015, pp. 120-122.

17. Zhechev Ye. S., Chernikova Ye. B., Belousov A. O., Gazizov T. R. Experimental research of a reflection symmetric modal filter in the time and frequency domains. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 2, pp. 162–179 (in Russian).

18. Khazhibekov R. R. Study of the amplitude-frequency characteristics of modal filters with a passive conductor in the form of a series of transmission line segments. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 31–36 (in Russian).

19. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142.

20. Zabolotsky A. M., Gazizov T.R. Experimental results on UWB pulse propagation in low-voltage power cables with different cross sections. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 229–231.

21. Belousov A. O., Vlasova N.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1862, no. 012020, pp. 1–5.

22. Surovtsev R. S., Nosov A. V., Zabolotsky A. M., Gazizov T.R. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 1864–1871.

23. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. Analysis of the reservation methods with modal filtration base. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 117–144 (in Russian).

24. Samoylichenko M. A., Zhechev. Y.S., Kosteletskii V. P., Gazizov T. R. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 2021, vol. 63, no. 2, pp. 435–442.

25. Samoylichenko M.A., Gazizov T. R. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1862, no 012020, pp. 1–7.

26. Gazizov T. R., Sagiyeva I. Ye., Kuksenko S. P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations. *Complexity*, 2019, vol. 2019, 11 p.

Статья поступила 23 июля 2021 г.

Информация об авторе

Самойличенко Мария Александровна – аспирант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: компьютерное моделирование распространения сигналов; электромагнитная совместимость. E-mail: 1993mary2011@mail.ru

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40.

Modal filters for protection against ultrashort pulses: a study of the possibilities of effective use in double-sided printed circuit boards

M. A. Samoylichenko

The relevance of the work: The development of modern radioelectronic equipment (REE) is steadily moving to continuous growth of speed, autonomy and compactness. The designers are constantly searching for new signal transmission technologies and REE design methods. However, expanded operating frequency range, reduced supply voltage levels, and increased mounting density worsen the electromagnetic environment; elements of REE are becoming more vulnerable to electromagnetic interference. A dangerous type of such noise is an ultra-short pulse (USP), which is a powerful conducted interference of short duration. There is a large selection of protective devices but their specifications often limit their applicability. Therefore, it is relevant to improve their characteristics by simplifying their design and decreasing their manufacturing costs. A much simpler, in circuitry design and fabrication, is a device protecting from USPs, which is called a modal filter (MF). The significant advantages of MFs are their low weight, high reliability, radiation resistance, and high speed of operation. In addition, MFs can be integrated into printed circuit boards (PCBs), particularly, a double-sided one. One of the known options is the MF on a double-sided PCB with edge and broadside coupled conductors. However, because of the large number of passive conductors, it may be difficult to integrate such an MF into the PCB. Therefore, **the purpose of the work** was to investigate the effect of removing one and two passive conductors in an MF on a double-sided printed circuit board with edge and broadside coupled conductors. **Result:** It is shown that it is possible to decompose a USP in the MF realized on a double-sided PCB with edge and broadside coupled conductors when one and two passive conductors were removed. The attenuation of the signal was found to be the same for the modal filter with the conductors and without them. **Methods used:** The simulation was performed using the quasistatic analysis. **Practical relevance** consists in the possibility to provide a simple and low-cost protection against USPs in widely used double-sided printed circuit boards.

Key words: modal filter, ultra-short pulse, printed circuit board, conductor influence.

Information about Author

Maria Aleksandrovna Samoylichenko – postgraduate student of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: computer simulation of signal propagation; electromagnetic compatibility. E-mail: 1993mary2011@mail.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.